

## 垂直管内気液固三相流動に関する基礎的研究

著者	畠山 信夫
号	1597
発行年	1994
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10404">http://hdl.handle.net/10097/10404</a>

氏 名	はたけ やま のぶ お 夫
授 与 学 位	博 士 （ 工 学 ）
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 15 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 45 年 3 月 一関工業高等専門学校機械工学科卒業
学 位 論 文 題 目	垂直管内気液固三相流動に関する基礎的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 千田 侑 東北大学教授 松岡 功 東北大学教授 橋本 弘之 東北大学助教授 益山 忠

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

気液固三相流は、固体粒子輸送用のエアリフトポンプや石炭の液化プラントなどにおいてみられる流動現象である。気液固三相流における流動特性を解明しその結果を工学に応用するためには、気液固三相流の実験と共に流動現象をモデル化して一般的な法則を見つけ出し、流動現象を予測する手法を確立する必要がある。

本研究は、垂直管内気液固三相流における流動特性を解明する手法を確立することを目的に行ったものである。このため、気液固三相流における流動様式、基礎式、流動パラメータの関係式ならびに数値解法に関して系統だった研究を行い、さらにそれらを固体粒子輸送用エアリフトポンプに応用しその有効性について論じたものである。

### 第 2 章 垂直管内気液固三相流における流動様式

流動様式を客観的に把握することは、流動モデルを想定する上でも重要であり、またそれらの遷移について検討することは、それぞれのモデルにおいて解析された結果の適用範囲を明らかにする上でも必要不可欠である。本章では、垂直管内気液固三相流における流動様式に関する研究について述べている。

体積率変動  $f_k$  の確率密度関数は、統計量として  $M$  次までのモーメントが与えられるならば、最大エントロピー原理によって推定しうることを示した。確率密度の形態が単峰形であるか双峰形であるかは確率密度関数の極値の数によって知ることができるゆえ、4 次までのモーメント ( $M=4$ )

によって確率密度関数の推定がなされるものとすれば、判別式の符号によって単峯形か双峯形かを客観的に判定することができることを示した。

確率密度の形態と目視観察による流動様式とは明らかに相関関係がみられ、気体の容積流束の小さい場合の単峯形における流動様式は気泡流と一致しており、双峯形における流動様式は間欠流（スラグ流あるいはフロス流）と、気体の容積流束の大きい場合の単峯形における流動様式は環状流と一致していることが分かった。

体積率変動の統計的パラメータと流動様式とは密接な関係があり、特に、ひずみ度  $S_{jk}$  とがり度  $K_{jk}$  によって双峯形（間欠流）と単峯形（気泡流および環状流）とを次式によって定量的に区分することができることを示し得た。

$$K_{jk} = (4/3)S_{jk}^2 + 2$$

さらに、気液固三相流における流動様式間の遷移式について、気液二相流の研究結果をもとに検討し、新たに相関式として呈示することができた。

### 第3章 気液固三相流動の理論的考察

本章では、気液固三相流動を管路による流体輸送の一環と考えて、その流動を第2章の観察結果に基づいて理論的に考察している。なお、考察する上で次のことを前提としている。すなわち、管路の直径は数十 mm 以上とし、気相はその大きさが数 mm 程度以上でかつ種々の大きさのものが液相中に分散して存在するものとする。また、固相は水力輸送でいうところの中粒子以上のもの（大きさは数 mm 程度）を対象とし、それらは主に液相中に分散しているものとするが、大きな気泡の中にも存在するものがあると考え。さらに、流れの状態は本質的に乱流とみなしている。それゆえ、圧力こう配は比較的大きいと考え、界面における界面力は相対的に小さく、また界面エネルギーも主流の乱流エネルギーと比較して小さいものとして無視できるものとする。

気液固三相流の基礎式は、固相も連続体的に取り扱うものとすれば、単相流における基礎式をもとに導出される。気液固三相流に限らず混相流は単相流の場合と異なり、相間の界面における輸送項によって特徴付けられる。界面を数学的に表現し、各相の特性関数（定義関数あるいは相関数）および界面に対する界面積濃度（単位体積当たりの界面積）ならびに外向き単位法線ベクトルを定義すれば、瞬時・局所的な基礎式が導かれる。瞬時・局所的な基礎式は与えられた初期条件および境界条件に対して原理的には解けるはずであるが、その困難さのため、実際の解析には平均された基礎式が用いられる。基礎式の平均方法には、時間平均、空間平均およびアンサンブル平均（数学的期待値）があるが、いずれの方法を用いても得られる式の形は同一である。それゆえ、ここではアンサンブル平均された局所の基礎式を導出している。平均操作をすることは、物理量の値を平均値と変動成分とにより表されるということを前提としており、その結果、平均化された基礎式には変動成分による相関項が現れる。なお、これらの相関項は何らかの方法で与えられるものとして定式化している。

次に、管内流れを対象とするために、流路断面で平均することによって、半径方向の分布を考慮

した一次元の基礎式を三流体モデルおよび混合体モデルの1つであるドリフト流束を用いて誘導した。さらに、完結問題について考察し、基礎式を数学的に閉じた形にするために必要な流動パラメータの関係式について検討している。

#### 第4章 垂直管内気液固三相流に関する実験

本章では、第3章において考察した垂直管内気液固三相流における流動パラメータの関係式について実験的に検討している。すなわち、実験装置および各種の計測装置を製作し、各相の平均速度および平均体積率ならびに圧力損失について実験的に検討した。その結果、次のことが得られた。

従来の気液二相流における気相のドリフト速度の表示式を適用し、気相の分布パラメータについて実験的に検討したところ、流動様式にかかわらず1つの実験式によって表すことができた。

$$C_{GO} = 1.20 - 0.2 \exp(-2.5 f_G)$$

ここに、 $f_G$  は気相の平均体積率である。また、気泡流領域における分布パラメータについて、体積率および速度分布を考慮することによって、定義式に基づいて検討することができた。

固相の平均速度は、混合体の容積流束  $J_M$  よりも質量中心速度  $V_M$  を用いることによってよい相関係が得られることを示し、かつ固相の分布パラメータに対して次式を得ることができた。

$$C_{SO} = \{1.10 - 0.05 \exp(-10 f_G)\} V_M / J_M$$

また、得られた気相および固相の平均速度に関する相関式は、各相の平均体積率を十分なる精度で表し得ることが分かった。

圧力損失に関して、従来の気液二相流における Lockhart-Martinelli 法を修正した修正 L-M 法によって垂直管内気液固三相流における摩擦損失を整理することができることが確かめられた。また、Chisholm-Laird の相関式の実験定数（係数） $A$  について他の研究者の実験結果も併せて検討したところ管径  $D$  に関する無次元数の関数として次式のように表すことができた。

$$A = 52 (D \sqrt{\rho_L g / \sigma_i})^{-0.2}$$

ここに、 $\rho_L$  は液相の密度、 $\sigma_i$  は表面張力、 $g$  は重力加速度である。

摩擦損失に対して修正 L-M 法を、位置損失に対してドリフト流束を用いた方法を適用して算出された全圧力損失と実験結果とを比較したところ、両者はよく一致することが確かめられた。

#### 第5章 一次元気液固三相流動のシミュレーション

本章では、一次元気液固三相流動のシミュレーションに関する研究について述べている。すなわち、一次元気液固三相流動の数値解析法について検討するために、まず、一次元流動の基礎式を一般形保存式に置き換え、この一般形保存式をもとにコントロールボリューム法による離散化式について、物理的現実性に留意しながら吟味した。次に、その結果を踏まえ、混合体モデルの1つであ

るドリフト流束に基づく一次元気液固三相流動の基礎式に対する離散化式について検討した。その際、運動量保存式の解法には Patankar の提示した SIMPLER 法を適用した。このようにして誘導された一次元流動の離散化式は連立した非線形方程式群を構成するため、これらの方程式の数値計算法について検討した。さらに、定常流における流動解析を境界値問題として捕らえその解法について考察を加えた。

従来の気液固三相流に関する研究においては加速損失はほとんどの場合無視されていたが、このことについて数値解析を通して検討した。その結果、従来の研究における実験条件においては、加速損失は無視できる程度の大きさであることが確かめられた。しかしながら、気相の容積流束が大きい場合には位置損失と同程度になり得ることも分かった。

本研究の数値解析法を深海底鉱物資源を揚鉱するためのエアリフトポンプに対して応用することを念頭に置き、斎藤らおよび Weber らによる比較的大規模な固体粒子輸送用のエアリフトポンプ（管径：151～300mm，全管長：55～450m）の流動特性について数値解析を行った。その結果、解析結果は実験値を偏差指標 16% 程度の精度で予測しうることが分かった。

## 第 6 章 結 論

各章において示したように、本研究は、気液固三相流における流動様式、基礎式、流動パラメータの関係式ならびに数値解法に関して系統だった研究を行い、垂直管内気液固三相流における流動特性を解明する手法を呈示したものである。その結果、一次元気液固三相流動の流動パラメータにかかわる流動様式、各相の平均速度、各相の平均体積率、圧力損失などの基礎資料を得るとともに、種々の境界条件および各相の容積流束の広い範囲に対して基礎式を数値解法することが可能となり、かつ深海底鉱物資源を揚鉱するためのエアリフトポンプの設計に役立つことを示し得たことは、工学的に寄与したものと考えている。

今後、局所における流動パラメータの関係式ならびに熱流束に関する関係式について検討されるならば、気液固三相流における流路断面の流動・伝熱特性をも解明することが可能となり、工学的にさらなる発展がはかれるものと確信する。

## 審 査 結 果 の 要 旨

エアリフトポンプは、通常のポンプとは異なり、可動部を有さないことから、保守点検が困難な環境下の流体輸送に向いている。このため深海底に賦存するマンガン団塊の揚鉤システムとして、固体粒子輸送用エアリフトポンプが検討され、研究が進められている。このシステムを設計するためには、実規模実験が困難なことから模型による実験結果を基に、シミュレーションを行い、設計基礎資料を得なければならない。しかしながら、気液固三相流の流動現象を数学的に表現することは現状では容易でなく、かつシミュレーションもかなり困難であることから、設計に供し得る適切な基礎資料がかならずしも十分に得られていないようである。

本論文は、垂直管内気液固三相流の流動特性に関し、流動様式、基礎式、流動パラメータの関係式ならびに数値解法を呈示することを目的とし、固体粒子輸送用エアリフトポンプの設計に指針を与えようとするものであり、全編6章よりなる。

第1章は、緒論である。

第2章では、垂直管内気液固三相流における体積率変動の統計的パラメータと流動様式とは密接な関係があることを示し、かつ客観的判別法とともに流動様式を区別する相関式を新たに呈示した。

第3章では、気液固三相流動を調べるため、数学的期待値を基に三相の存在率を考慮に入れた保存則を検討し、各相の分布パラメータを導入した一次元基礎式を導出している。これは優れた成果である。

第4章では、第3章において導出した基礎式を解く際に必要な流動パラメータの関係式を実験的に求めている。すなわち、各相の平均速度、平均体積率ならびに圧力損失の測定結果を基に相関式を求めている。これは有用な成果である。

第5章では、第3章および第4章の成果を基に数値解析を行い、エアリフトポンプによるスラリー輸送量などを十分な精度で予測し得ることを示している。さらに小規模な実験装置では無視し得た加速損失は大規模な装置では無視し得ないことを指摘している。これは貴重な知見である。

第6章は、結論である。

以上要するに、本論文は、エアリフトによる固体粒子の輸送などを対象として、垂直管内気液固三相流動について、実験的かつ理論的に検討を加え、三相流の管内体積率変動特性による流動様式の新たな定量的判別法を示している。さらに三相の存在率を考慮に入れた保存則の検討結果を基に、各相の分布パラメータを導入した一次元基礎式を導出し、数値解析を行った結果、エアリフトのスラリー輸送量などを十分な精度で予測し得ることを示すなど、垂直管内気液固三相流動について工学的に新しい知見を得たものであり、資源工学ならびに混相流工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。